



★ ★ ★ ★
“十三五”
国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
国防现代化建设

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

装甲防护技术 研究

Armor Protection Technology Research

曹贺全 孙葆森 徐龙堂 赵宝荣 孙素杰 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家出版基金项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

国之重器出版工程

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

装甲防护技术研究

曹贺全 孙葆森 徐龙堂 赵宝荣 孙素杰 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书介绍了典型反装甲弹药、装甲防护技术体系、装甲防护基本原理、装甲材料以及几种特种装甲的发展和应用。在掌握近年来国外装甲防护技术的基础上,根据多年工作经验,侧重于应用和近年来的发展,对装甲防护技术尽可能全面系统地进行了详细介绍。

本书可供从事装甲与反装甲以及坦克装甲车辆研究、设计、生产和管理人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考书籍。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

装甲防护技术研究/曹贺全等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2019. 5

(陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书)

国家出版基金项目 “十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程

ISBN 978 - 7 - 5682 - 6978 - 0

I. ①装… II. ①曹… III. ①装甲防护 - 研究 IV. ①E923

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 078037 号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 固安县铭成印刷有限公司

开 本 / 710 * 1000 mm 1/16

印 张 / 26

字 数 / 453 千字

版 次 / 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 李秀梅

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》

编写委员会

名誉主编：王哲荣 苏哲子

主 编：项昌乐 李春明 曹贺全 丛 华

执行主编：闫清东 刘 勇

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 越 王伟达 王英胜 王钦钊 冯辅周

兰小平 刘 城 刘树林 刘 辉 刘瑞林

孙葆森 李玉兰 李宏才 李和言 李党武

李雪原 李惠彬 宋克岭 张相炎 陈 旺

陈 炜 郑长松 赵晓凡 胡纪滨 胡建军

徐保荣 董明明 韩立金 樊新海 魏 巍



编者序

坦克装甲车辆作为联合作战中基本的要素和重要的力量，是一个最具临场感、最实时、最基本的信息节点，其技术的先进性代表了陆军现代化程度。

装甲车辆涉及的技术领域宽广，经过几十年的探索实践，我国坦克装甲车辆技术领域的专家积累了丰富的研究和开发经验，实现了我国坦克装甲车辆从引进到仿研仿制再到自主设计的一次又一次跨越。在车辆总体设计、综合电子系统设计、武器控制系统设计、新型防护技术、电子电气系统设计及嵌入式软件设计、数字化与虚拟仿真设计、环境适应性设计、故障预测与健康管理等新型工艺等方面取得了重要进展，有些理论与技术已经处于世界领先水平。随着我国陆战装备系统的理论与技术所取得的重要进展，亟需通过一套系统全面的图书，来呈现这些成果，以适应坦克装甲车辆技术积淀与创新发展的需要，同时多年来我国坦克装甲车辆领域的研究人员一直缺乏一套具有系统性、学术性、先进性的丛书来指导科研实践。为了满足上述需求，《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》应运而生。

北京理工大学出版社联合中国北方车辆研究所、内蒙古金属材料研究所、北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院、南京理工大学、中国人民解放军陆军军事交通学院和中国兵器科学研究院等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，策划出版了本套反映坦克装甲车辆领域具有领先水平的学术著作。本套丛书结合国际坦克装甲车辆技术发展现状，凝聚了国内坦克装甲车辆技术领域的主要研究力量，立足于装甲车辆总体设计、底盘系统、火力防护、电气系统、电磁兼容、人机工程等方面，围绕装甲车辆“多功能、轻量化、网



络化、信息化、全电化、智能化”的发展方向，剖析了装甲车辆的研究热点和技术难点，既体现了作者团队原创性科研成果，又面向未来、布局长远。为确保其科学性、准确性、权威性，丛书由我国装甲车辆领域的多位领军科学家、总设计师负责校审，最后形成了由14分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》（第一辑），具体名称如下：《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆制造工艺学》《装甲车辆悬挂系统设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲防护技术研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆试验学》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆故障诊断技术》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《坦克装甲车辆电气系统设计》《装甲车辆嵌入式软件开发方法》《装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术》。

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》内容涵盖多项装甲车辆领域关键技术工程应用成果，并入选“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目、“国之重器出版工程”和“国家出版基金”项目。相信这套丛书的出版必将承载广大陆战装备技术工作者孜孜探索的累累硕果，帮助读者更加系统全面地了解我国装甲车辆的发展现状和研究前沿，为推动我国陆战装备系统理论与技术的发展做出更大的贡献。

丛书编委会



前 言

进攻与防护是战争永恒的主题。装甲防护技术是随着反装甲弹药技术的发展而逐步发展起来的一项集材料、结构和先进制造技术于一体的技术。自第一辆装甲车辆诞生以来，近一个世纪装甲防护技术已由最初的均质钢技术发展到目前以先进装甲材料、复合装甲、反应装甲、主动防护以及特种装甲集成的综合防护技术，从而形成一门涉及材料科学、结构力学、爆炸力学、火炸药学、弹道学、探测传感、指挥控制技术等多学科的交叉学科。在国防技术领域已经形成了一支从事装甲防护科研、设计和生产的技术队伍。

装甲防护系统是坦克装甲车辆火力、动力、装甲防护、电子信息四大系统之一。随着新型反坦克弹药技术的发展，单一的装甲防护已不能满足坦克装甲车辆战场生存力的需求，于是如何使车辆“不被遭遇、不被发现、不被捕获、不被击中、不被击穿、不被击毁”的系统防护技术是未来陆军装甲车辆防护技术的发展方向。但是，如何做到“不被击穿和不被击毁”的装甲防护技术仍然是装甲车辆战场生存力的基础，它直接关系到坦克装甲车辆的生存力和轻量化，是综合防护技术中的关键技术。

张自强等装甲防护科研工作者曾经出版的《装甲防护技术基础》和曹贺全等出版的《装甲防护技术》，为我国装甲防护科研奠定了基础并指明了研究方向。随着国际上装甲与反装甲技术发展的日新月异，作战环境与过去有了较大变化。大规模野外作战减少，城市作战、复杂环境的反恐作战居多。在这样作战环境中，陆军坦克装甲车辆受到了全方位、立体化先进武器如先进穿甲弹、破甲弹、智能化弹药等的攻击。反装甲武器从品种、威力都有了长足的发



展，因此装甲防护技术已经有了质的飞跃。装甲材料由单一高性能防护材料向多种复合材料发展，结构由单一均质装甲向复合装甲、反应装甲以及更多的特种装甲发展。

先进装甲研究设计中高性能计算、模拟仿真逐渐代替了以往“画加打”的落后方法。此外，新的防护技术大量应用，尤其是特种防护技术如复合装甲、反应装甲和主动装甲使装甲防护技术水平有了本质的飞跃，装甲防护性能大幅度提高，满足了坦克装甲车辆轻量化以及战场生存力的要求。

本书根据作者多年来装甲防护科研工作经历，记载了几十年我国装甲防护技术的发展，着重论述了近年来装甲防护技术的发展和应用。全书共 9 章，介绍了典型反装甲弹药、装甲防护技术体系、装甲抗弹效应、现代装甲材料、复合装甲、反应装甲、主动防护系统技术、结构装甲，以及装甲抗弹性能测试技术及评定等内容。

本书可供从事装甲防护技术和反装甲技术研究的科研院所、设计部门、生产单位和相关管理人员参考，也可供高等院校坦克装甲车辆系统相关专业师生参考。

本书在编写过程中，参考了大量国内外的文献资料，在此对原文献作者表示谢意。

受作者水平和学科领域所限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

作者



目 录

第 1 章 典型反装甲弹药	001
1.1 概述	002
1.2 枪弹	003
1.2.1 普通枪弹	003
1.2.2 钢芯弹	004
1.3 单兵反坦克火箭弹	005
1.4 无坐力炮	008
1.5 坦克炮弹和反坦克炮弹	008
1.5.1 穿甲弹	009
1.5.2 破甲弹	012
1.5.3 榴弹	013
1.6 反坦克导弹	017
1.7 远程火箭弹	022
1.8 战斗部侵彻过程	026
1.8.1 穿甲过程	026
1.8.2 破甲过程	032
1.8.3 爆炸成型战斗部侵彻过程	035
1.9 小结	036



第 2 章 装甲防护技术体系	039
2.1 概述	040
2.2 装甲防护技术的发展	042
2.2.1 国外发展概况	042
2.2.2 国内发展概况	043
2.3 装甲防护技术体系	044
2.3.1 装甲防护材料技术	046
2.3.2 装甲防护结构单元技术	046
2.3.3 装甲防护集成技术	046
2.3.4 装甲防护的应用基础技术	047
第 3 章 装甲抗弹效应	049
3.1 概述	050
3.2 复合装甲抗弹效应	050
3.2.1 倾角效应	050
3.2.2 间隙效应	079
3.2.3 厚度效应	091
3.2.4 尺寸效应	101
3.2.5 形状效应	105
3.2.6 方向效应	107
3.3 反应装甲抗弹效应	112
3.3.1 偏转效应	112
3.3.2 角度效应	117
3.3.3 间距效应	118
3.3.4 动态板厚	119
第 4 章 现代装甲材料	121
4.1 概述	122
4.2 装甲钢	123
4.2.1 装甲钢的基本特点	124
4.2.2 装甲钢的分类	125
4.2.3 装甲钢的成分与性能	125
4.2.4 装甲钢的应用	129



4.3	装甲铝合金	130
4.3.1	装甲铝合金的基本特点	131
4.3.2	装甲铝合金的分类	132
4.3.3	装甲铝合金的成分与性能	135
4.3.4	装甲铝合金的应用	137
4.4	装甲钛合金	140
4.4.1	装甲钛合金的基本特点	140
4.4.2	装甲钛合金的分类	141
4.4.3	装甲钛合金的成分与性能	142
4.4.4	装甲钛合金的应用	144
4.5	装甲镁合金	145
4.5.1	装甲镁合金的基本特点	145
4.5.2	装甲镁合金的分类	146
4.5.3	装甲镁合金的成分与性能	147
4.5.4	装甲镁合金的应用	148
4.6	贫铀合金	151
4.6.1	贫铀合金的化学成分	151
4.6.2	贫铀合金的性能	152
4.6.3	贫铀合金的应用	153
4.7	抗弹陶瓷	154
4.7.1	抗弹陶瓷的基本特点	155
4.7.2	抗弹陶瓷的分类	155
4.7.3	抗弹陶瓷的成分与性能	157
4.7.4	抗弹陶瓷的应用	159
4.8	树脂基纤维复合材料	164
4.8.1	玻璃纤维复合材料	165
4.8.2	芳纶纤维复合材料	167
4.8.3	超高分子量聚乙烯纤维	169
4.8.4	PBO 纤维抗弹复合材料	170
4.8.5	混杂纤维抗弹复合材料	171
4.9	透明装甲	172
4.9.1	有机透明材料	173
4.9.2	无机透明材料	174
4.9.3	夹层材料	177



4.9.4	透明装甲的应用	177
第5章	复合装甲	181
5.1	概述	182
5.2	复合装甲的种类	185
5.3	轻型金属复合装甲	186
5.3.1	钢复合装甲及其抗弹性能	186
5.3.2	铝复合装甲及其抗弹性能	190
5.3.3	贫铀装甲	191
5.4	陶瓷复合装甲	192
5.4.1	基本结构	193
5.4.2	抗弹机理	194
5.4.3	设计基础	203
5.5	重型复合装甲	213
5.5.1	基本结构及抗弹性能	213
5.5.2	抗弹机理	216
5.5.3	设计基础	218
5.6	复合装甲设计方法	223
5.6.1	复合装甲抗弹能力的设计	223
5.6.2	复合装甲抗弹能力的计算	228
5.6.3	装甲材料结构的综合优化	233
5.7	复合装甲装车应用研究的程序	236
5.7.1	装车的结构方案设计	236
5.7.2	缩比样车模型制作	237
5.7.3	全尺寸样车模型制作	237
5.7.4	样车用特种装甲结构的设计及制造	237
5.7.5	车辆兼容性试验	238
5.7.6	样车综合性射击试验	238
5.7.7	样车装甲结构设计定型	238
5.8	复合装甲的应用前景	239
第6章	反应装甲	241
6.1	概述	242
6.2	反应装甲的种类	244



6.3	惰性反应装甲及其应用	247
6.3.1	惰性反应装甲基本特点	247
6.3.2	惰性反应装甲基本结构	249
6.3.3	惰性反应装甲基本原理	251
6.3.4	惰性反应装甲设计基础	256
6.3.5	惰性反应装甲的应用	264
6.4	爆炸反应装甲及其应用	266
6.4.1	爆炸反应装甲基本特点	266
6.4.2	爆炸反应装甲基本结构	270
6.4.3	爆炸反应装甲基本原理	272
6.4.4	爆炸反应装甲设计基础	274
6.4.5	爆炸反应装甲的应用	282
第7章	主动防护系统技术	293
7.1	概述	294
7.2	主动防护系统构成与分类	295
7.3	硬杀伤主动防护系统	296
7.3.1	探测跟踪系统（雷达波探测、跟踪）	297
7.3.2	信号处理及控制系统（计算、反馈）	297
7.3.3	对抗系统	298
7.4	软杀伤主动防护系统	302
7.5	综合杀伤主动防护系统	303
7.6	主动防护系统应用前景	303
第8章	结构装甲	305
8.1	概述	306
8.2	屏蔽装甲	307
8.2.1	格栅装甲	307
8.2.2	侧裙板	315
8.2.3	多孔结构装甲	320
8.3	间隙装甲	325
8.3.1	板状间隙式装甲	325
8.3.2	管状间隙装甲	330
8.4	护体装甲	333

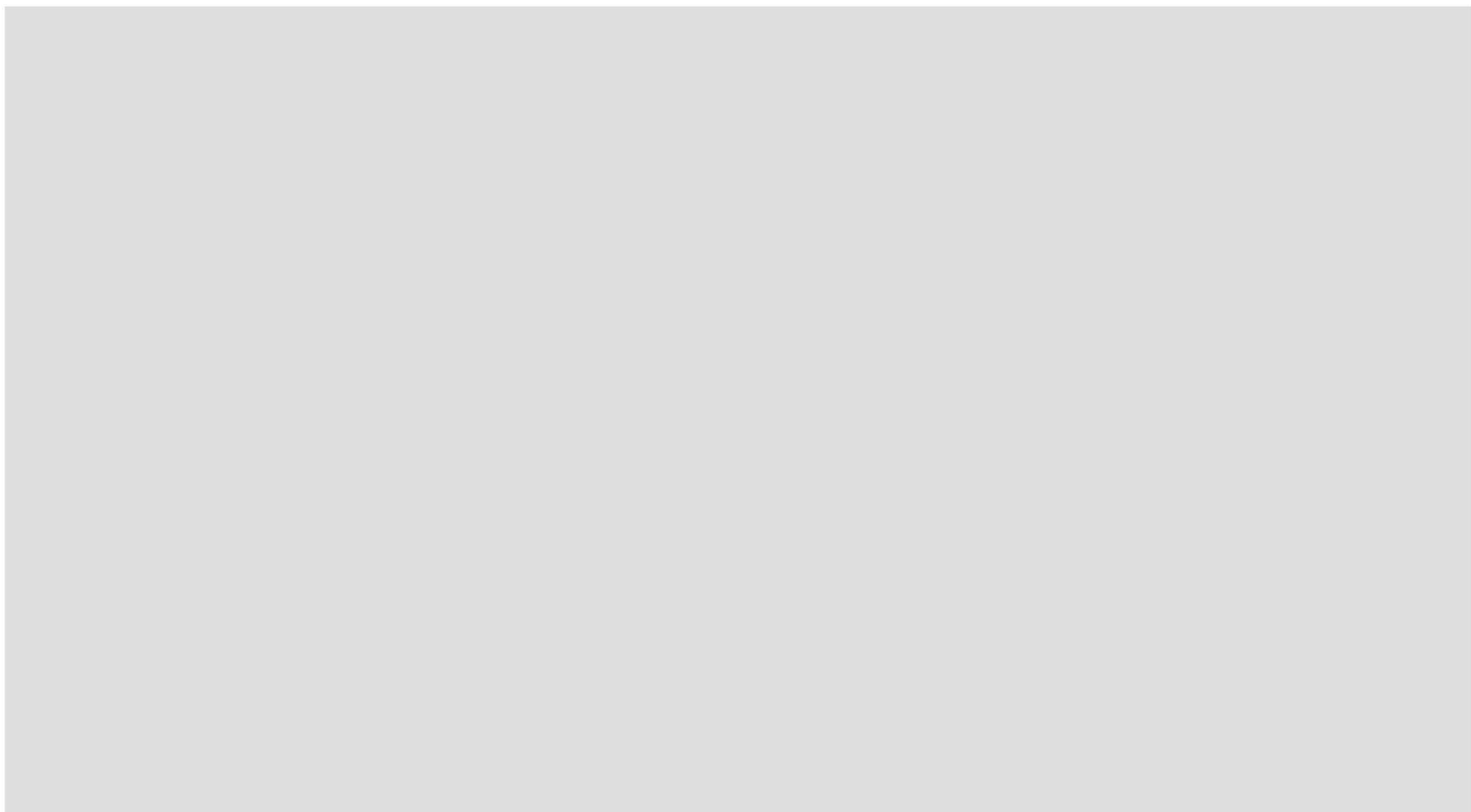


8.4.1	软护体装甲	334
8.4.2	刚性护体装甲	336
8.4.3	新型护体装甲	338
8.4.4	基本原理	339
8.5	间隔防护	340
第9章	装甲抗弹性能评定	345
9.1	装甲抗弹性能评定中常用术语及定义	347
9.2	装甲被击穿的基本形式及损伤分类	349
9.2.1	装甲被击穿的基本形式	349
9.2.2	装甲损伤的分类及其评定	351
9.3	复合装甲抗弹性能评定	362
9.4	反应装甲抗弹性能评定	363
	参考文献	366
	部分常用符号对照表	371
	索引	375



第 1 章

典型反装甲弹药





| 1.1 概 述 |

反装甲武器是指以击穿坦克和其他装甲目标为目的的武器总称，通常也称为反坦克武器。具体地讲，反装甲武器包括航空兵器、地面炮兵压制兵器、反坦克导弹、坦克炮、迫击炮、无坐力炮、火箭筒、地雷等。自从 1916 年英国最先把坦克作为进攻性武器用于战争起，坦克与反坦克技术的斗争从来就没有停止过。

随着科学技术的进步，反坦克技术得到了迅速的发展。第二次世界大战期间，反坦克技术还比较落后，此时反坦克地雷是战场上的主角。据统计，当时战场上使用了一亿多颗反坦克地雷，炸毁坦克一万多辆，造成装备损失率达 20.7%。在朝鲜战场和越南战场上，70% ~ 85% 的受损坦克是被地雷炸毁的。1973 年爆发的第四次中东战争，直瞄反坦克武器和反坦克导弹占了明显的优势。这次战争中双方共损失 3 000 多辆坦克，其中坦克打坦克损失 1 000 多辆，约占 1/3；另外 1/2 的坦克被火箭筒和导弹击毁；剩余的 1/6 坦克被飞机和地雷击毁。20 世纪 90 年代爆发的海湾战争中，诸多高新技术的反坦克武器被首次使用并取得了显著的效果，标志着战争高技术时代的到来。双方参战坦克 7 900 辆，伊拉克损失坦克 3 500 辆，其中 2 000 多辆坦克在进入地面战斗前损失，进入地面战斗后又损失了 1 500 多辆坦克，其中被武装直升机击毁的也不在少数。根据报道，一架 AH—64 “阿帕奇”武装直升机可以携带 19 枚导弹，在 5 000 m 以外就可以攻击坦克，达到一架飞机对付 2 辆坦克的战绩。美国进行



武装直升机和坦克模拟对抗试验时，双方毁伤率达到 1:20 ~ 1:10 的悬殊比例。机动灵活的武装直升机打坦克是现代高新技术发展的结果。

20 世纪 80 年代以来高新军事科学技术的发展，一方面增强了坦克的综合防护性能，另一方面也改变了传统的反坦克武器装备。高精度、大威力的反坦克武器弹药是对坦克防护技术的严峻考验。目前反坦克武器已经逐步发展成为空地结合、前沿和纵深相结合、射程梯次配置的立体反坦克武器系统，如图 1-1 所示。这个系统具有两个基本特点：①针对装甲车辆形成正面、侧面、顶部和底部在内的三维空间反坦克火力网；②反坦克武器弹药呈现多兵种、多样化、智能化的发展趋势。由此可见，高技术条件下的反装甲手段已经具有大纵深、立体、全方位和多手段的特点，可对坦克实施“远、中、近”大面积的纵深打击。在图 1-1 中，作为装甲防护设计人员，需要重点关注的主要有以下几种威胁。

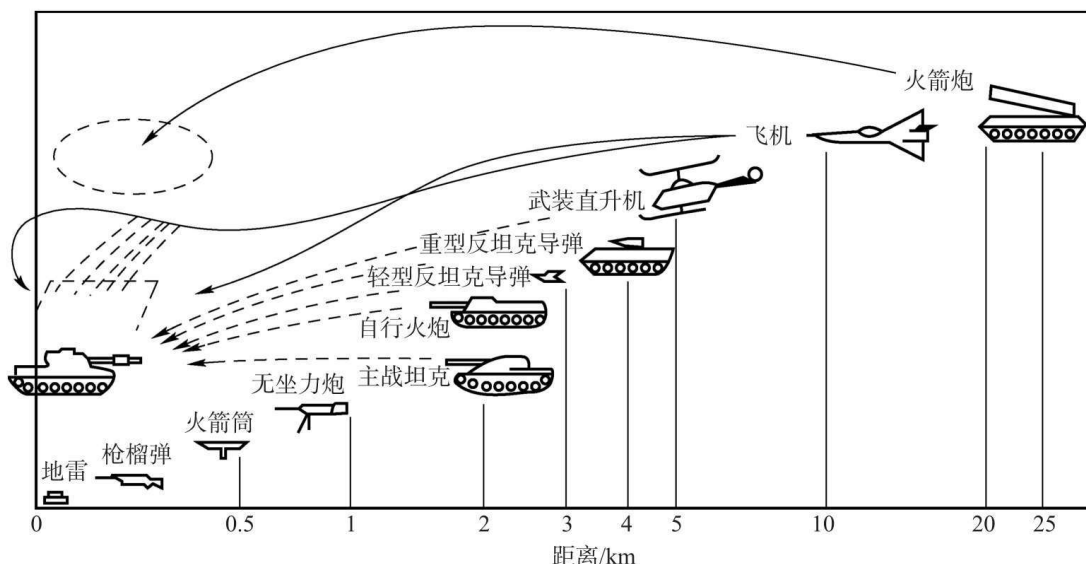


图 1-1 不同距离上的反坦克武器

| 1.2 枪 弹 |

1.2.1 普通枪弹

普通枪弹的口径在 4 ~ 9 mm 范围内，虽不具备穿甲功能，但对轻装甲防护